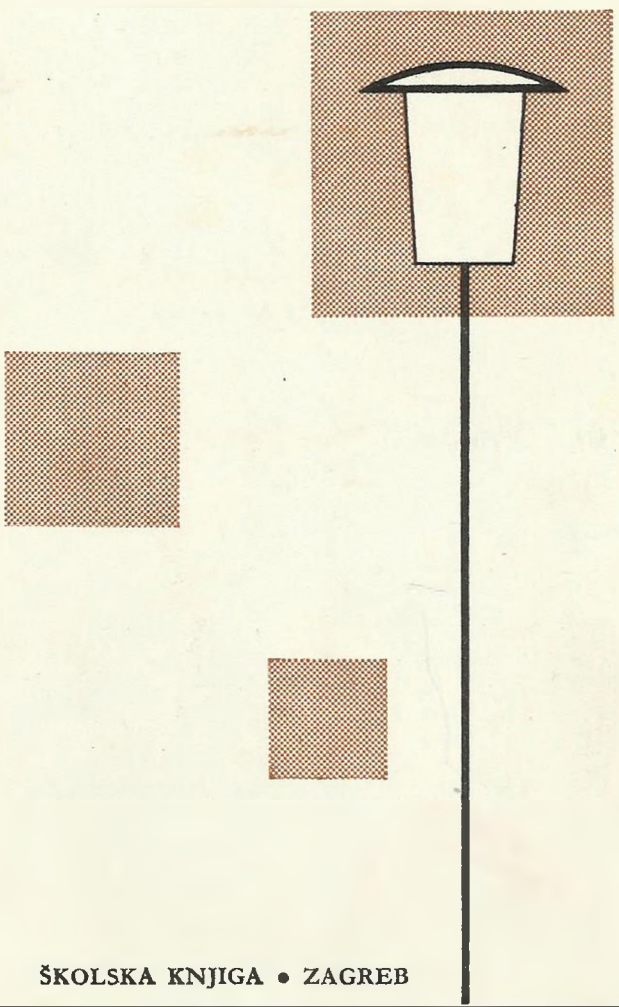
USMJERENO OBRAZOVANJE

Tomić

ELEKTRIČNA RASVJETA



ŠKOLSKA KNJIGA • ZAGREB

S-135/5

21 117

BORIS TOMIĆ, dipl. ing.

ELEKTRIČNA RASVJETA

V. izdanje

1950 1980 ŠK

ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1980

Stručni urednik
Dr. ing. ŽELJKO MATUTINOVIĆ

Stručni recenzenti
Prof. ing. VIKTOR PINTER
ERNEST ŽIDOVEC, dipl. ing.
VIKTOR ŠIMEK, dipl. ing.

Omot opremio
ŽIVKO HARAMIJA, akad. slikar

Tisak: Štamparski zavod »Ognjen Prica«, Zagreb

UVOD

Budući da su osnovni optički pojmovi poznati iz fizike, ovdje ćemo ih samo još ukratko nadopuniti nekim razmatranjima koja su za rasvjetnu tehniku od bitne važnosti.

Elektromagnetska zračenja što ih zovemo svjetlošću sastoje se od zraka čije valne duljine leže približno u granicama od $(4000—7600) \cdot 10^{-10}$ m. Sve te zrake tvore svjetlosni spektar, koji sadrži ovih sedam boja svjetlosti:

ljubičastu,	s	valnim	duljinama	od	$(4000—4200) \cdot 10^{-10}$ m,
modru,	„	„	„	„	$(4200—4600) \cdot 10^{-10}$ m,
plavu,	„	„	„	„	$(4600—5100) \cdot 10^{-10}$ m,
zelenu	„	„	„	„	$(5100—5600) \cdot 10^{-10}$ m,
žutu,	„	„	„	„	$(5600—5900) \cdot 10^{-10}$ m,
narančastu,	„	„	„	„	$(5900—6100) \cdot 10^{-10}$ m,
crvenu,	„	„	„	„	$(6100—7600) \cdot 10^{-10}$ m.

Valne duljne koje su navedene za svaku pojedinu boju spektra samo su približne, jer u području svake boje postoji čitav niz nijansa, pa su i prijelazi između boja postepeni, tj. među bojama nema neke izrazite, oštre granice.

Iza crvenih zraka, sa sve većim i većim valnim duljinama, javljaju se toplinske, infracrvene zrake, zatim ultrakratki, kratki, srednji i dugi radiovalovi, dok se ispred ljubičastih zraka, sa sve manjim i manjim valnim duljinama, javljaju ultraljubičaste i rendgenske zrake, pa gama-zrake i kozmičke zrake.

U usporedbi s čitavim elektromagnetskim spektrom područje vidljivih zračenja veoma je usko: ljudsko oko ima, prema tome, vrlo ograničenu sposobnost razabiranja ovih zračenja.

Oko nije jednako osjetljivo ni na sve zrake vidljivog spektra; najosjetljivije je na zrake čija valna duljina iznosi $5550 \cdot 10^{-10}$ m, dakle na zelenu boju. Da bi razabralo boje veće ili manje valne duljine od navedene mora se oko jače naprezati. Ako želimo da oko ima osjećaj jednakoga intenziteta i pri razabiranju ostalih boja, odnosno njihovih nijansa, mora njihova svjetlost biti za izvjestan postotak jača.

Zbog ovoga razloga zelena boja djeluje najpovoljnije na zdravlje oka, a, prema tome, i na ljudsku psihu; oko se, naime, u tom slučaju najmanje napreže.

Ako pri jednako jakoj rasvjeti promatramo dva jednaka predmeta od kojih je jedan crvene, a drugi plave boje, primijetit ćemo zanimljivu pojavu: pri slabijoj rasvjeti plava boja ostavlja svjetliji, a crvena tamniji dojam, dok pri jačoj rasvjeti crvena boja djeluje svjetlije, a plava tamnije. Inače, crvena i žuta boja svjetlosti djeluju svjetlije i stvaraju ugodno, »toplo« raspoloženje, dok plava i ljubičasta boja svjetlosti stvaraju sumorno, »hladno« raspoloženje.

Zbog toga se za unutrašnju rasvjetu (ukoliko nema potrebe za točnim raspoznavanjem boja) upotrebljava prvenstveno takva rasvjeta čija boja svjetla ima crvenkast karakter; takva se rasvjeta ostvaruje žaruljama i fluorescentnim cijevima za toplo svjetlo.

Sposobnost oka da razabire okolne predmete osniva se na njegovoj osjetljivosti za kontraste, tj. za razlike u izgledu pojedinih dijelova promatranoga područja. Ona je to veća, što su veći kontrasti. Ovo svojstvo oka nazivamo oštrinom vida.

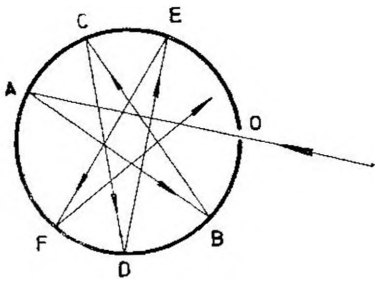
Eksperimenti su pokazali da oštrina vida ovisi u velikoj mjeri o sastavu svjetlosti. Pri jednobojnom (monokromatskom) svjetlu oštrina je vida oko 2—3 puta veća nego pri višebojnom (polikromatskom) svjetlu. Tome je razlog kromatska aberacija. Zato se u onim slučajevima kad se želi omogućiti najveća oštrina vida upotrebljavaju svjetlosni izvori koji proizvode jednobojnu svjetlost (natrijeve žarulje).

1. TEMPERATURA BOJE SVJETLA

Danas se boje svjetla izražavaju u °K. Da bismo shvatili što je to temperatura boje, promotrit ćemo ponašanje tzv. crnog tijela na raznim povišenim temperaturama.

Pod apsolutno crnim tijelom razumijeva se tijelo koje bi potpuno upilo sva svjetlosna zračenja koja na nj padnu. Njegova sposobnost apsorpcije iznosila bi, dakle, 100%, dok bi mu sposobnost refleksije bila jednaka nuli.

Takvo tijelo u prirodi ne postoji ali se ono može prilično uspješno ostvariti na umjetan način, kako je to prikazano na sl. 1.



Sl. 1. Apsolutno crno tijelo ostvareno na umjetan način

O - otvor u posudi

Svjetlosna zraka koja kroz otvor **O** uđe u posudu (što je načinjena od nepropusnog materijala, npr. od željeznog lima, i iznutra premazana tamnim premazom) i padne na točku **A**, djelomice će se reflektirati, a djelomice će je upiti tamni premaz stijene. Reflektirana zraka smanjene energije past će na točku **B** unutrašnje stijene gdje će zbog apsorpcije opet izgubiti jedan dio energije. Oslabljena će zraka sada pasti na točku **C** pa na točke **D, E** itd., sve dok je unutrašnja stijena posude potpuno ne apsorbira.

Ako izvana gledamo kroz otvor **O**, on će nam se — zato što iz njega ne izlazi nijedna svjetlosna zraka — činiti savršeno crn.

Apsolutno crno tijelo zrači na nekoj određenoj povišenoj temperaturi više energije nego bilo koje drugo tijelo. Osim toga, bez obzira na materijal od kojega je izrađeno, apsolutno crno tijelo zrači na istoj temperaturi uvijek radijacije iste snage i istog sastava.

Na temperaturama ispod 500° K potpuno crno tijelo zrači samo nevidljiva zračenja, i to uglavnom infracrvena. Kad mu temperatura prijeđe 500° K, počinje ono isijavati i vidljive zrake. Iz početka su to samo crvene zrake ali tokom daljeg povišenja temperature pridolaze postepeno i zračenja manjih valnih duljina, tako da se svjetlosni spektar sve više upotpunjuje.

Bez obzira na temperaturu tijela, uvijek veći dio njegova zračenja otpada na toplinu. Omjer je između vidljivog i infracrvenog zračenja to veći što je viša temperatura.

Tijela s kakvima se u životu susrećemo nisu crna, nego siva ili selektivna.

Sivim tijelima smatramo tijela kod kojih je odnos između energije njihova zračenja i energije zračenja apsolutno crnog tijela uvijek isti na istim temperaturama i za sve valne duljine zračenih radijacija. Taj je omjer uvijek manji od jedinice, ali je za svako sivo tijelo konstantan.

Selektivna tijela su tijela kod kojih spomenuti omjer nije konstantan, nego zavisi o temperaturi i valnoj duljini zračenja; i ovaj je omjer uvijek manji od jedinice.

Većina tijela u prirodi pripada skupini selektivnih tijela.

Svjetlosna zračenja sivih i selektivnih tijela karakteriziramo s pomoću temperature boje. Pod temperaturom boje razumijeva se ona temperatura na kojoj apsolutno crno tijelo zrači svjetlo jednake boje kao sivo, odnosno selektivno tijelo koje je ugrijano na neku određenu temperaturu. Temperatura boje uvijek je viša od temperature svijetlećega tijela.

Kad velimo, npr., da fluorescentna cijev ima temperaturu boje 3500° K, to znači da bi potpuno crno tijelo trebalo užariti na temperaturu od 3500° K kako bi moglo zračiti svjetlo iste boje kao dotična fluorescentna cijev.

2. SVJETLOTEHNIČKE VELIČINE I JEDINICE

Ovamo pripadaju:

2.1. svjetlosni tok izvora svjetlosti,
2.2. jakost svjetlosti izvora,
2.3. luminancija svijetleće plohe,
2.4. osvijetljenost obasjane površine,
2.5. iskorištenje svjetlosnoga izvora,
2.6. specifični potrošak svjetlosnoga izvora i
2.7. korisnost rasvjete.

2.1. Svjetlosni tok izvora svjetlosti

Pod svjetlosnim tokom Φ svjetlosnoga izvora razumijeva se ona količina svjetlosne energije što je promatrani izvor isijava u okolni prostor u jednoj sekundi.

Prema tome je svjetlosni tok, zapravo, svjetlosna snaga proizvedena na račun električne snage **P**, dakle, količine električke energije što je svjetlosni izvor utroši u jednoj sekundi. Svjetlosni tok mjeri se u lumenima (lm).

Ako je svjetlosni izvor u pogonu za vrijeme **t**, a svake sekunde izrači tok Φ, onda će on isijati ukupnu količinu svjetlosti **Q**. Količina svjetlosti jednaka je, dakle, umnošku svjetlosnog toka i vremena za koje je svjetlosni izvor u pogonu:

$$Q = \Phi \cdot t \tag{1}$$

Količina svjetlosti **Q** jeste, prema onome što je rečeno, svjetlosna radnja, a mjeri se u lumensekundama (lms) ili u lumensatima (lmh).

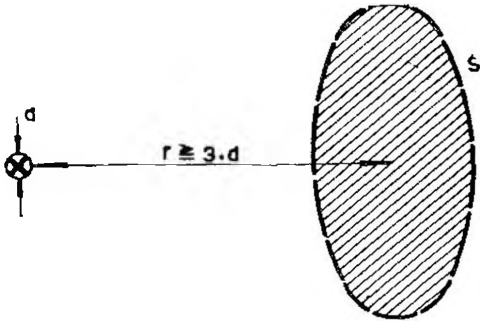
2.2. Jakost svjetlosti izvora

Zamislimo točkasti svjetlosni izvor, tj. svjetlosni izvor čije su dimenzije malene s obzirom na njegovu udaljenost od promatrača ili od plohe koju obasjava. Da bi se svjetlosni izvor mogao smatrati točkastim, mora udaljenost **r** obasjane plohe **S** od svjetlosnog izvora biti najmanje tri puta veća od njegova promjera (sl. 2).

Promatrajmo sada svjetlosni tok $\Delta\Phi$ što ga točkasti svjetlosni izvor isijava u određenom smjeru (sl. 3). Pretpostavimo da snop zraka koje tvore tok $\Delta\Phi$ ima oblik stošca čiji vrh leži na površini svjetlosnoga izvora. Prostor omeđen ovim stošcem zove se prostorni kut $\Delta\omega$.

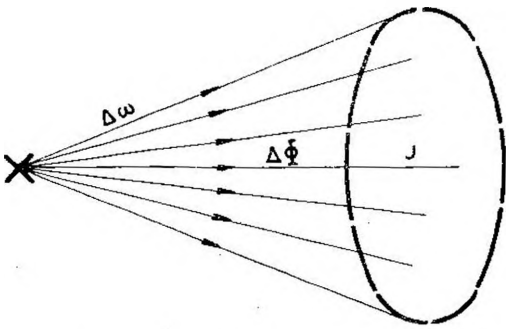
Velimo da je jakost svjetlosti jednaka gustoći isijavanoga svjetlosnog toka u odgovarajućem prostornom kutu, dakle:

$$J = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega} \tag{2}$$



Sl. 2. Uvjet za smatranje svjetlosnoga izvora točkastim

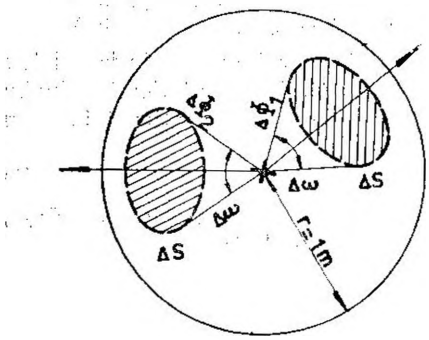
d - promjer svjetlosnog izvora; A - obasjana ploha; r - udaljenost obasjane plohe od svjetlosnog izvora



Sl. 3. Definicija jakosti svjetlosti

$\Delta\omega$ - prostorni kut; $\Delta\Phi$ - svjetlosni tok, koji prolazi kroz $\Delta\omega$; J - jakost svjetlosti

Ne postoji nijedan svjetlosni izvor, ni prirodni ni umjetni, koji bi svijetlio jednako jako u svim smjerovima, dakle, gdje bi jakost isijavane svjetlosti bila u svim pravcima ista. U stvarnosti svaki izvor zrači kroz jednak prostorni kut $\Delta\omega$ u raznim smjerovima razne svjetlosne tokove (sl. 4).



Sl. 4. Jedinična kugla

$\Delta\omega$ - prostorni kut; $\Delta\Phi$ - svjetlosni tok; ΔA - površina kružne kalote na kugli; r = 1 m - polumjer jedinične kugle

Zamislimo da je oko svjetlosnoga izvora kao središta opisana kugla polumjera 1 m; to je tzv. jedinična kugla (sl. 4). Svaki prostorni kut $\Delta\omega$ izrezuje na njenoj površini kalotu površine ΔS. Kod svjetlosnih izvora s kakvima imamo posla u životu prolaze kroz pojedine površine ΔA različiti svjetlosni tokovi $\Delta\Phi$.

Kad bi izvor svijetlio jednoliko, onda bi kroz svaki prostorni kut $\Delta\omega$ prolazio jednak svjetlosni tok $\Delta\Phi$. U takvu slučaju mogli bismo pisati općenito:

$$J = \frac{\Phi}{\omega} \tag{3}$$

Površina A kalote što je iz oplošja jedinične kugle izrezuje prostorni kut ω jeste:

$$A = \omega \cdot r^2 = \omega \cdot 1 = \omega$$

Ako je ta površina A = 1 m², onda se odgovarajući prostorni kut zove steradijan. Steradijan (sr) je jednak prostornom kutu stošca s vrhom u središtu jedinične kugle, koji na površini kugle zahvaća površinu 1 m²

$$1 \text{ sr} = \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2}.$$

Kako je jediničnoj kugli oplošje

$$O = 4 \cdot r^2 \cdot \pi = 4 \cdot \pi = 12{,}57 \text{ m}^2,$$

to znači da ona sadrži i 12,57 steradijana.

Pri jednolikoj svjetlosnoj emisiji prolazio bi kroz svaki od njih jednak tok koji bi iznosio $\frac{1}{12{,}57}$ ukupnoga isijavanoga svjetlosnog toka. Jakost svjetlosti u bilo kojem smjeru bila bi u takvu slučaju jednaka gustoći toka u steradijanu, dakle:

$$J = \frac{\Phi}{12{,}57} \tag{4}$$

Kako smo već spomenuli, kod svjetlosnih izvora u praksi svjetlosna je emisija više ili manje nejednolična. Ali, i u tom slučaju možemo primijeniti formulu (4) ako računamo s prosječnom ili tzv. srednjom prostornom odnosno sferičkom jakošću svjetlosti J_0.

Pod srednjom prostornom jakošću svjetlosti J_0 razumijevamo onu jakost koju bi svjetlosni izvor imao kada bi pri istom ukupnom svjetlosnom toku Φ svijetlio jednoliko u svim smjerovima.

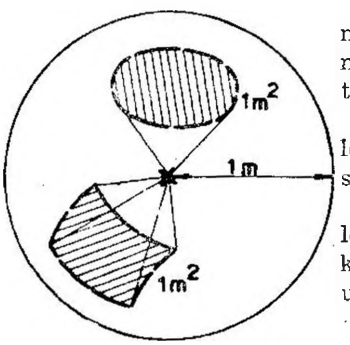
Dakle je:

$$J_0 = \frac{\Phi}{12{,}57} \text{ cd} \tag{5}$$

S pomoću ovoga izraza možemo odrediti srednju prostornu jakost svjetlosti J_0 ako nam je poznat svjetlosni tok Φ što ga isijava promatrani svjetlosni izvor.

Ako nam je poznata srednja prostorna jakost svjetlosti J_0, onda možemo odrediti odgovarajući svjetlosni tok:

$$\Phi = 12{,}57 \cdot J_0 \text{ lm} \tag{6}$$



Sl. 5. Jedinični prostorni kut

Candela (cd) je svjetlosna jakost koju u okomitom smjeru zrači površina od 1/600 000 m² crnog tijela na temperaturi skrućivanja platine pod tlakom od 325 pascala.

Pošto smo upoznali jedinicu za jakost svjetlosti, možemo sada definirati jedinicu za mjerenje svjetlosnog toka.

Jedinica svjetlosnog toka *lumen* (lm) je svjetlosni tok koji u prostorni kut od 1 sr šalje točkasti svjetlosni izvor, kojemu je svjetlosna jakost u svim smjerovima jednaka 1 cd: (1 lm = 1 cd · 1 sr).

To znači da ovakav svjetlosni izvor isijava ukupno svjetlosni tok od $4 \cdot \pi = 12{,}57$ lm.

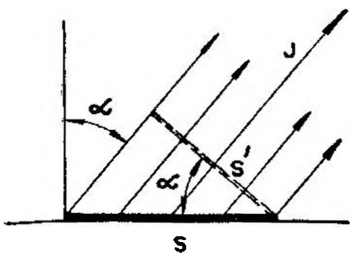
Npr., ako je srednja prostorna jakost svjetlosti $J_0 = 200$ cd, onda taj izvor isijava svjetlosni tok:

$$\Phi = J_0 \cdot 12{,}57 = 200 \cdot 12{,}57 = 2\,514 \text{ lm}$$

2.3. Luminancija svijetleće plohe

Pod luminancijom ili gustoćom svjetlosti **B** svijetleće plohe u nekom smjeru razumijeva se jakost svjetlosti **J** što je u tom smjeru isijava 1 m² prividne površine promatrane plohe.

Luminancija je, prema tome, jednaka omjeru između jakosti svjetlosti u određenom smjeru i projekcije svijetleće plohe okomito na promatrani smjer (sl. 6).



$$B = \frac{J}{A'} = \frac{J}{A \cdot \cos \alpha} \qquad (7)$$

Sl. 6. Značenje luminancije

J - jakost svjetlosti u smjeru promatrača; A - svijetleća površina; A' - prividna veličina svijetleće površine S

Jedinica luminancije cd po m² $\frac{cd}{m^2}$ je luminancija homogenog izvora ravne površine 1 m² koji zrači svjetlost jakosti 1 cd u smjeru okomitom na tu površinu

$$1 \text{ cd/m}^2 = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2}.$$

Iz slike vidimo da je prividna površina $A' = A \cdot \cos \alpha$; promatraču se čini kao da svijetleća ploha ima površinu **A'**.

2.4. Osvijetljenost obasjane površine

Kada izvjestan svjetlosni tok Φ padne na neku plohu, površine **A**, on je osvijetli, ostvarujući na njoj jakost rasvjete **E**. Naravno, da je onda osvijetljenost te plohe ovisna o veličini upadnog svjetlosnog toka, kao i o veličini površine obasjane plohe: ona je to veća što je veći svjetlosni tok, odnosno manja obasjana površina.

Veoma mala površina ΔA obasjana tokom $\Delta \Phi$ ima osvijetljenost

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A} \qquad (8)$$

Ako promatrana površina ima veličinu **A**, a osvjetljuje je svjetlosni tok Φ, onda je njena srednja osvijetljenost

$$E = \frac{\Phi}{A} \tag{9}$$

Govorimo o srednjoj (prosječnoj) osvijetljenosti zato što na pojedine male površine ΔS obasjane plohe ne pada jednak svjetlosni tok $\Delta \Phi$; naime, neki su dijelovi plohe osvijetljeni jače, a neki slabije. Srednja osvijetljenost **E** jednaka je, prema tome, srednjoj aritmetičkoj vrijednosti zbroja osvijetljenosti pojedinih točaka dotične plohe.

Ako svjetlosni tok izrazimo u lm, a veličinu obasjane površine u m^2, dobivamo osvijetljenost u lm/m^2 ili luksima (lx).

Osvijetljenost 1 lx ima površina od 1 m^2 ako na nju pada svjetlosni tok od 1 lm; $1\ lx = \frac{1\ lm}{1\ m^2}$.

Ako npr., na površinu $A = 96\ m^2$ pada svjetlosni tok $\Phi = 3\,840$ lm, imat će ona srednju osvijetljenost

$$E = \frac{3\,840}{96} = 40\ lx$$

Obratno, ako poznamo osvijetljenost **E** u lx i veličinu obasjane površine **A** u m^2, možemo odrediti potreban svjetlosni tok Φ, jer iz formule (9) proizlazi

$$\Phi = E \cdot S \tag{10}$$

Ako, npr., želimo na površini $A = 46\ m^2$ ostvariti osvijetljenost $E = 100$ lx, moramo na nju dovesti svjetlosni tok

$$\Phi = 100 \cdot 46 = 4\,600\ lm$$

2.4.1. Zakon udaljenosti

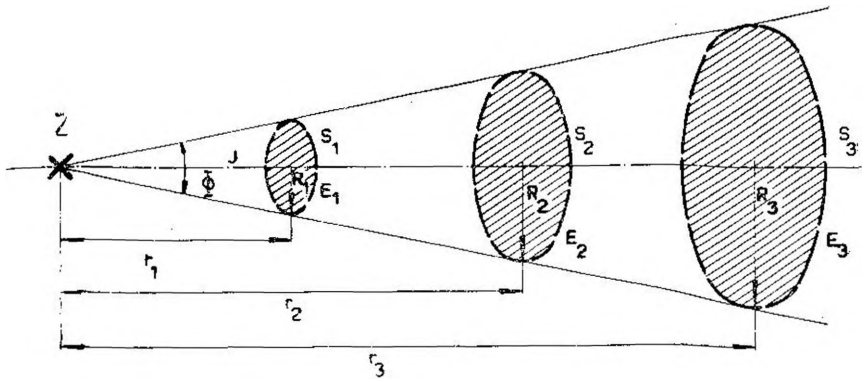
U slučaju kada svjetlosne zrake padaju na obasjanu plohu okomito, a njena je udaljenost **r** od svjetlosnog izvora velika prema dimenzijama izvora, vrijedi tzv. zakon udaljenosti, koji glasi:

Osvijetljenost **E** obasjane površine **A** razmjerna je s jakošću svjetlosti **J**, a obrnuto razmjerna s kvadratom udaljenosti **r** te površine od svjetlosnog izvora:

$$E = \frac{J}{r^2} \tag{11}$$

To proizlazi iz ovoga razmatranja: zamislimo točkasti svjetlosni izvor **Z** na sl. 7. i promatrajmo snop svjetlosnih zraka koje on isijava kroz prostorni kut ω u vodoravnom smjeru; u tom će smjeru svjetlost imati jakost

$$J = \frac{\Phi}{\omega}$$



Sl. 7. Zavisnost osvijetljenosti o udaljenosti od svjetlosnog izvora

Z - svjetlosni izvor; *J* - jakost svjetlosti; r_1, r_2, r_3 - udaljenosti pojedinih ploha od izvora svjetlosti; A_1, A_2, A_3 - obasjavane površine; E_1, E_2, E_3 - osvijetljenosti na pojedinim površinama; R_1, R_2, R_3 - polumjeri obasjavanih površina; Φ - svjetlosni tok

Ako okomito na os svjetlosnog snopa postavimo u udaljenosti r_1 od svjetlosnog izvora neku ravnu plohu, onda će na njoj svjetlosni snop obasjavati kružnu površinu A_1 i davati joj osvijetljenost

$$E_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{\Phi}{R_1^2 \cdot \pi}$$

Ako tu istu plohu odmaknemo u smjeru osi svjetlosnog snopa na udaljenost od izvora $r_2 = 2 \cdot r_1$, porast će u istom razmjeru i polumjer kružne plohe što je isti svjetlosni snop na njoj obasjava, dakle, $R_2 = 2 \cdot R_1$; istovremeno će veličina obasjane površine A_2 porasti četverostruko:

$$A_2 = R_2^2 \cdot \pi = (2 \cdot R_1)^2 \cdot \pi = 4 \cdot R_1^2 \cdot \pi = 4 \cdot A_1$$

Budući da je svjetlosni tok Φ ostao nepromijenjen, mora se osvijetljenost razmjerno smanjiti:

$$E_2 = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{\Phi}{4 \cdot A_1} = \frac{1}{4} \cdot E_1$$

Ako se razmak poveća na $r_3 = 3 \cdot r_1$, povećat će se polumjer obasjanoga kruga na $R_3 = 3 \cdot R_1$ a njena površina deveterostruko:

$$A_3 = R_3^2 \cdot \pi = (3 \cdot R_1)^2 \cdot \pi = 9 \cdot R_1^2 \cdot \pi = 9 \cdot A_1; \text{ itd.}$$

Ako umjesto Φ pišemo $J \cdot \omega$, a umjesto A stavimo $r^2 \cdot \omega$, onda je

$$E = \frac{J \cdot \omega}{r^2 \cdot \omega} = \frac{J}{r^2}$$

Ovaj je zakon dovoljno točan samo onda ako sve svjetlosne zrake dolaze na obasjanu plohu direktno, dakle, najkraćim putem iz svjetlosnoga izvora; tako je to, npr., kad se radi o reflektorima. Ako svjetlosne zrake ne dolaze na plohu samo direktnim putem nego se jedan dio njih prethodno reflektira od drugih ploha onda taj zakon ne vrijedi. Tako, npr., kad se radi o rasvjeti zatvorenih prostorija, ovaj zakon ne vrijedi ako izvjestan dio svjetlosnoga toka dolazi na osvijetljenu plohu refleksijom od zidova i stropa; u tom slučaju, naime, promjena udaljenosti svjetlosnoga izvora od obasjane plohe uzrokuje razmjerno manju promjenu osvijetljenosti **E**.

2.5. Iskorištenje svjetlosnog izvora

Pod iskorištenjem svjetlosnog izvora razumijeva se omjer između ukupnoga svjetlosnoga toka Φ što ga svjetlosni izvor isijava i električne snage **P** koju za to troši:

$$\zeta = \frac{\Phi}{P} \text{ lm/W} \tag{12}$$

Iskorištenje svjetlosnog izvora veoma je važna veličina jer nam služi kao mjerilo za prosuđivanje ekonomičnosti raznih svjetlosnih izvora.

Ako, npr., žarulja od 40 W daje svjetlosni tok od 325 lm, onda je njeno svjetlosno iskorištenje

$$\zeta = \frac{325}{40} = 8{,}12 \text{ lm/W}$$

To znači da ova žarulja na račun svakog utrošenog vata proizvede svjetlosni tok od 8,12 lm.

Žarulja od 1 000 W proizvodi tok od 19 000 lm, pa je njeno iskorištenje

$$\zeta = \frac{19\,000}{1\,000} = 19 \text{ lm/W}$$

Ova žarulja za svaki utrošeni vat proizvede tok od 19 lm.

Odavde vidimo da je jača žarulja ekonomičnija. To je razumljivo zbog ovoga razloga: ako se radi o istom naponu u mreži, jača žarulja troši jaču struju pa nit mora biti većeg presjeka, dakle, i veće debljine; ako je, pak, nit deblja, ona može podnijeti veću gustoću struje i višu temperaturu (opasnost od pregaranja u tom je slučaju manja); zbog toga takva nit ima veću svjetlosnu emisionu sposobnost po svakom utrošenom vatu.

Radi usporedbe spomenut ćemo ovdje da fluorescentna cijev od 40 W i 220 V ima svjetlosni tok približno od 2 100 lm čemu odgovara iskorištenje

$$\zeta = \frac{2\,100}{40} = 53 \text{ lm/W}$$

Ako ovaj rezultat usporedimo s iskorištenjem žarulje od 40 W, koje iznosi samo 8,12 lm/W, vidjet ćemo da je fluorescentna cijev iste snage oko 6,5 puta ekonomičnija, jer uz isti potrošak električne snage proizvodi oko 6,5 puta više svjetlosne energije.

2.6. Specifični potrošak svjetlosnog izvora

Pod specifičnim potroškom svjetlosnog izvora razumijeva se omjer između utrošene električne snage **P** u vatima i proizvedenoga svjetlosnog toka Φ u lm:

$$\varepsilon = \frac{P}{\Phi} \text{ W/lm} \tag{13}$$

Taj nam pojam pokazuje koliko vata mora neki svjetlosni izvor utrošiti da bi proizveo svjetlosni tok od 1 lm. Specifični je potrošak recipročna vrijednost iskorištenja ζ, a služi nam također za prosuđivanje ekonomičnosti raznih svjetlosnih izvora.

Npr. žarulja od 40 W i 220 V ima specifičan potrošak

$$\varepsilon = \frac{40}{325} = 0{,}12 \text{ W/lm}$$

kod žarulje od 1 000 W i 220 V on je ovoliki:

$$\varepsilon = \frac{1\,000}{19\,000} = 0{,}053 \text{ W/lm}$$

a kod fluorescentnih cijevi od 40 W i 220 V ovoliki:

$$\varepsilon = \frac{40}{2\,100} = 0{,}019 \text{ W/lm}$$

2.7. Korisnost rasvjete

Korisnost rasvjete jeste omjer između svjetlosnoga toka Φ_i koji stvarno pada na obasjanu plohu (iskorišteni svjetlosni tok) i svjetlosnoga toka Φ što ga proizvode goli svjetlosni izvori (bez armature):

$$\eta = \frac{\Phi_i}{\Phi} \tag{14}$$

Na putu od svjetlosnih izvora do obasjane plohe izgubi se tok Φ_g tako da na tu plohu stigne samo tok

$$\Phi_i = \Phi - \Phi_g$$

Do gubitka svjetlosne energije dolazi zbog toga što svjetlosne zrake upija sredstvo od kojega je građena rasvjetna armatura, zatim prašina i nečistoća u zraku, na zidovima i stropu, a i zbog toga što svjetlosne zrake prolaze kroz prozore u vanjski prostor.

Veličina korisnosti rasvjete η zavisi u velikoj mjeri o vrsti armature, a i o vrsti rasvjete. Ona je veća:

a) što je bolja propustivost stakla ili slične svjetlopropusne materije koja potpuno ili samo djelomično okružuje svjetlosni izvor, i
b) što je veća refleksivna sposobnost onih sredstava od kojih se svjetlosne zrake reflektiraju na svom putu prema osvijetljenoj plohi (metalni ili zrcalni reflektor oko svjetlosnoga izvora, zidovi i strop).

Bez obzira na to o kakvoj se rasvjeti radilo, treba svakako računati s gubicima svjetlosne energije zbog kojih je korisnost rasvjete uvijek manja od jedinice, a leži u granicama od 0,1 do 0,7.

Ako, dakle, želimo na plohi površine A ostvariti osvijetljenost E, treba na tu plohu dovesti svjetlosni tok Φ_i:

$$\Phi_i = E \cdot A \quad lm$$

Zbog gubitaka svjetlosni izvori moraju proizvesti tok koji je određen prema izrazu (14):

$$\Phi = \frac{\Phi_i}{\eta} = \frac{E \cdot A}{\eta} \; lm \tag{15}$$

Npr. plohu A = 80 m² treba osvijetliti sa E = 200 lx; treba odrediti potreban tok svjetlosnih izvora ako je korisnost rasvjete $\eta = 0{,}32$.

Potreban tok svjetlosnih izvora morao bi iznositi:

$$\Phi = \frac{E \cdot A}{\eta} = \frac{200 \cdot 80}{0{,}32} = 50\,000 \quad lm$$

U ovom bi se slučaju izgubio svjetlosni tok od

$$50\,000 - (200 \cdot 80) = 50\,000 - 16\,000 = 34\,000 \quad lm$$

3. FOTOMETRIJSKO TIJELO

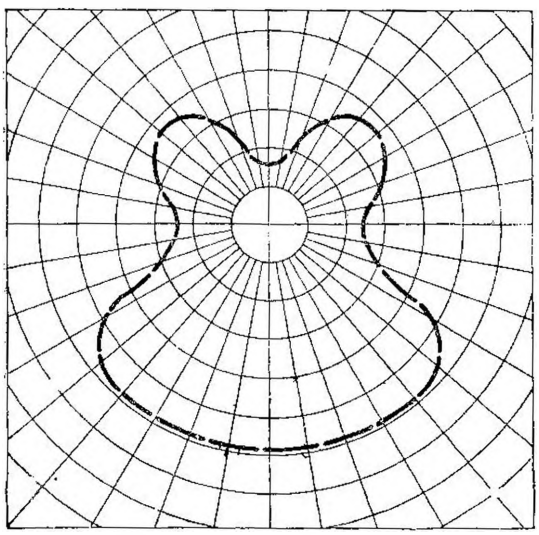
Kao što smo već prije naglasili, svjetlosni izvori imaju u raznim smjerovima razne jakosti svjetlosti. Ako mjerenjem utvrdimo jakosti svjetlosti u svim mogućim pravcima pa ih onda u odabranom mjerilu nanesemo kao vektore od središta svjetlosnoga izvora u pripadnim smjerovima, onda ćemo spajanjem krajnjih točaka tih vektora dobiti prostorno (trodimenzionalno) tijelo; takvo se tijelo naziva fotometrijskim tijelom dotičnoga izvora.

Kod većine svjetlosnih izvora to je tijelo rotaciono, tj. simetrično s obzirom na glavnu os svjetlosnoga izvora.

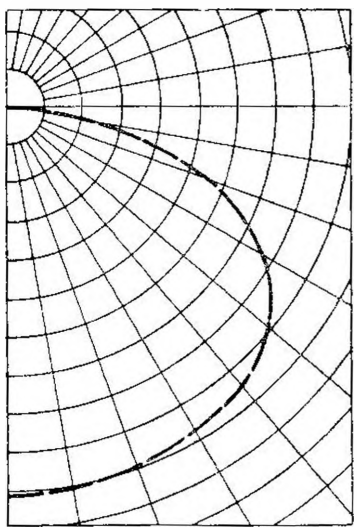
3.1. Svjetlosna karakteristika ili krivulja intenziteta

Ako fotometrijsko tijelo prerežemo ravninom položenom kroz glavnu os izvora, dobivamo kao presjek krivulju koja se zove svjetlosna karakteristika ili krivulja intenziteta.

Svjetlosna karakteristika ima u rasvjetnoj tehnici izvanredno važnu ulogu: ona nam pokazuje kako se svjetlost promatranoga izvora raspodjeljuje po okolnom prostoru. Svjetlosna karakteristika može se konstruirati za razne rasvjetne armature, pa nam onda omogućuje da odaberemo rasvjetnu armaturu kakva najbolje odgovara za svaki pojedini slučaj.



Sl. 8. Svjetlosna karakteristika



Sl. 9. Svjetlosna karakteristika

Takvu jednu karakteristiku prikazuje sl. 8. U središtu dijagrama (sjecište koordinatnog sustava) zamišljamo svjetlosni izvor; ako je njegova karakteristika simetrična s obzirom na vertikalnu os onda je dovoljno prikazati samo jednu njenu polovicu.

Karakteristike se redovno odnose na svjetlosni tok od 1 000 lm. Iz ishodišta dijagrama opisane su koncentrične kružnice čiji polumjeri u istom mjerilu pokazuju određenu jakost svjetlosti. Osim toga su iz ishodišta povučeni pravci pod raznim kutovima, tako da se iz dijagrama odmah vidi kolika je svjetlosna emisija pod izvjesnim kutom prema glavnoj osi svjetlosnog izvora.

Iz prikazane karakteristike vidi se da odgovarajuća armatura usmjeruje veći dio svjetlosnog toka u prostor ispod sebe, dok znatno manji dio svjetlosti odlazi u prostor iznad horizontale povučene kroz svjetlosni izvor. Takva bi, dakle, armatura bila prikladna za rasvjetu prostorija u kojima se želi rasvijetliti i strop.

Iz karakteristike koju prikazuje sl. 9. možemo na prvi pogled zaključiti da takva armatura dolazi u obzir tamo gdje treba čitav svjetlosni tok usmjeriti na obasjanu plohu direktno, dakle, najkraćim putem. Zato se takve armature upotrebljavaju u prostorijama u kojima ne želimo osvjetljivati strop i gornji dio zidova, nego samo gornji dio prostorije ili samo pojedina radna mjesta.

Svjetlosna karakteristika može nam korisno poslužiti i za određivanje svjetlosnoga toka s pomoću tzv. Rousseauova dijagrama.

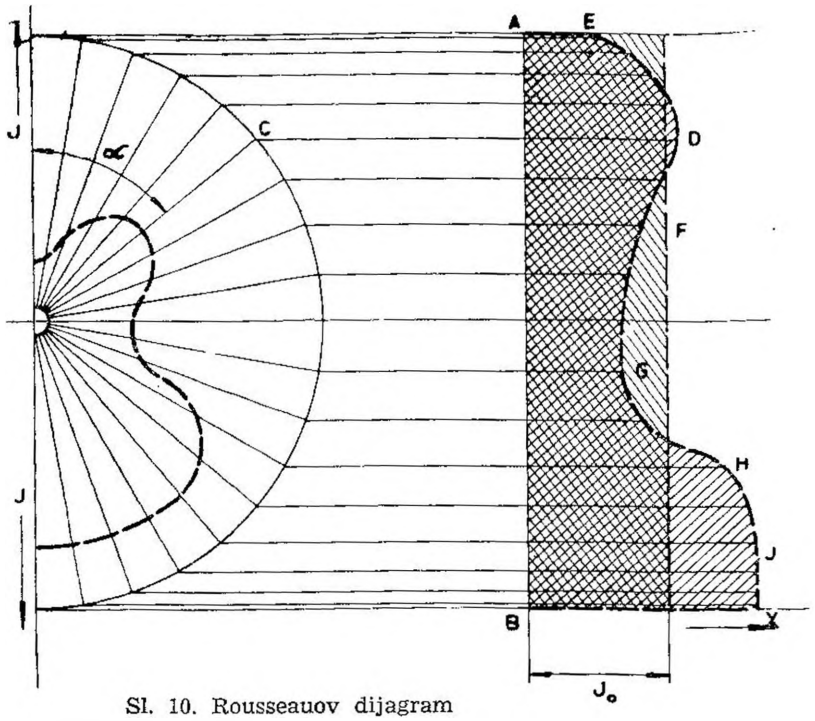
3.2. Rousseauov (Rusoov) dijagram

Iz svjetlosne karakteristike konstruirao je Rousseau tzv. krivulju svjetlosnoga toka, s pomoću nje je onda odredio srednju prostornu jakost svjetlosti. Prema izrazu (6) izračunao je svjetlosni tok.

Krivulja svjetlosnog toka konstruira se na ovaj način: lijevo ili desno od svjetlosne karakteristike povuče se ordinata **A—B** (sl. 10), koja s apscisom kroz svjetlosni izvor tvori koordinatni sustav. Iz središta karakteristike opiše se kružnica bilo kojega polumjera, i ona nam predočuje jediničnu kružnicu. Sada se iz središta karakteristike povuče zraka koja s vertikalom (glavna os svjetlosnog izvora) zatvara neki kut α. Iz točke **C**, u kojoj ta zraka siječe jediničnu kružnicu, povuče se apscisa i na nju se od ordinate **A—B** nanese jakost svjetlosti J_α izvora u smjeru nacrtane zrake. Na taj se način dobije točka **D** krivulje svjetlosnoga toka. Analogno ćemo postupiti za razne kutove α i dobit ćemo čitav niz točaka krivulje svjetlosnoga toka: **E, F, G** itd.

Spajanjem tih točaka dobit će se krivulja svjetlosnoga toka, koja zajedno s ordinatom **A—B** tvori Rousseauov dijagram. Površina omeđena krivuljom svjetlosnoga toka, ordinatom **A—B** i krajnjim apscisama **A—E** i **B—X** proporcionalna je svjetlosnom toku dotičnog svjetlosnog izvora.

Iz ovoga dijagrama naći ćemo srednju prostornu jakost svjetlosti J_0 kao visinu pravokutnika čija je baza jednaka ordinati **A—B**, a površina mu je jednaka površini Rousseauova dijagrama **A—E—X—B**. Očitat ćemo je u istom mjerilu u kojem su izražene pojedine jakosti svjetlosti u karakteristici.



Sl. 10. Rousseauov dijagram

A–B - promjer jedinične kružnice; E, D, F, G, H, J, X - pojedine točke dijagrama; J_0 - srednja prostorna jakost svjetlosti

Npr. neka u karakteristici 1 mm odgovara jakosti svjetlosti 5 cd; ako smo u Rousseauovu dijagramu izmjerili da J_0 iznosi 35 mm, onda je srednja jakost svjetlosti u cd:

$$J_0 = 35 \cdot 5 = 175 \text{ cd}$$

Traženi svjetlosni tok bio bi:

$$\Phi = 175 \cdot 12{,}57 = 2\,200 \text{ lm}$$

Primjeri:

1. Treba naći snagu **P** žarulje čiji je svjetlosni tok 4 800 lm a iskorištenje 16 lm/W; uz to treba naći i njen specifični potrošak.

a) Budući da je $\zeta = \frac{\Phi}{P}$, to je $P = \frac{4\,800}{16} = 300$ W.

b) Specifični potrošak iznosi:

$$\varepsilon = \frac{1}{\zeta} = \frac{P}{\Phi} = \frac{300}{4\,800} = \frac{1}{16} = 0{,}063 \text{ W/lm}$$

2. Žarulja od 200 W i 220 V nalazi se u armaturi koja propušta 60% od ukupno proizvedenog svjetlosnog toka; prema tome je korisnost same armature 0,6. Traži se: svjetlosni tok žarulje, iskorištenje svjetlosti žarulje i njen specifični potrošak, ako je propušteni tok $\Phi_a = 1\,644$ lm.

a) Svjetlosni tok žarulje iznosi:

$$\Phi = \frac{\Phi_a}{\eta_a} = \frac{1\,644}{0{,}6} = 2\,740 \text{ lm}$$

b) Iskorištenje žarulje iznosi:

$$\zeta = \frac{2\,740}{200} = 13{,}7 \text{ lm/W}$$

c) Specifični potrošak žarulje iznosi:

$$\varepsilon = \frac{200}{2\,740} = 0{,}073 \text{ W/lm}$$

3.3. Lambertov (Lamberov) zakon

Zamislimo užarenu metalnu kuglu koja ima:

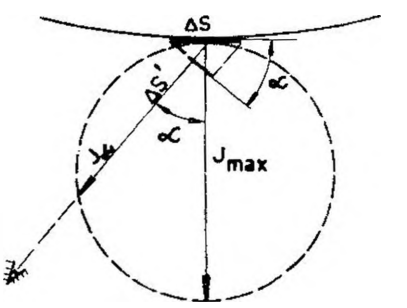
a) savršeno pravilan oblik,

b) savršeno glatku površinu i

c) savršeno jednoliku temperaturu,

tako da u svim smjerovima zrači svjetlost potpuno jednolično. Premda je svijetleća površina kugle zaobljena, promatraču se čini da je čitava ta površina jednako svijetla; on ima dojam da svaka točka površine ima jednak sjaj. Za takvu kuglu velimo da zrači svjetlost difuzno.

Kod difuznog zračenja svijetleće plohe svjetlost ima najveću jakost u smjeru koji je okomit na plohu. Jakost svjetlosti smanjuje se s porastom kuta α što ga smjer promatranja zatvara s okomicom na tu plohu (sl. 11).



Sl. 11. Lambertov zakon

ΔA - svijetleća površina; $\Delta A'$ - prividna veličina svijetleće površine ΔA; J_α - jakost svjetlosti pod kutom α prema vertikali na svijetleću površinu ΔA; J_{max} - najveća jakost svjetlosti u smjeru okomitom na svijetleću površinu ΔA

Jakost svjetlosti u bilo kojem smjeru određena je zakonom što ga je još godine 1760. otkrio njemački fizičar Lambert; taj zakon glasi:

$$J_\alpha = J_{max} \cdot \cos \alpha \tag{16}$$

Kod difuznog zračenja plohe svjetlosna je karakteristika kružnica koju svijetleća ploha tangira.

Ako promatrana ploha ima veličinu ΔA, onda je njena prividna veličina u smjeru promatranja:

$$\Delta A' = \Delta A \cdot \cos \alpha$$

pa je njezina luminancija:

$$B = \frac{J_\alpha}{\Delta A'} = \frac{J_\alpha}{\Delta A \cdot \cos \alpha}$$

Možemo pisati:

$$\cos \alpha = \frac{J_\alpha}{J_{max}} = \frac{\Delta A'}{\Delta A} = \frac{A'}{A}$$

odnosno:

$$B = \frac{J}{A'} = \frac{J_{max}}{A} = \text{konst.} \tag{17}$$

4. FOTOMETRIJSKA MJERENJA

S pomoću fotometrijskih mjerenja određuje se:

4.1. jakost svjetlosti **J**,

4.2. svjetlosni tok Φ i

4.3. osvijetljenost **E** obasjane plohe.

4.1. Mjerenje jakosti svjetlosti

Kod ovoga se mjerenja iskorišćuje poznati zakon udaljenosti (11). Princip mjerenja sastoji se u tome da se jedna te ista glatka bijela ploha osvijetli istovremeno s obiju strana; s jedne strane obasjava je svjetlosni izvor čiju jakost svjetlosti poznajemo, dok je s druge strane obasjava svjetlosni izvor čiju jakost svjetlosti mjerimo. Kod mjerenja se mijenja udaljenost mjerne plohe od obaju svjetlosnih izvora tako dugo dok nam se ne učini da je ona s obiju strana osvijetljena jednako jako.

U tom je momentu osvijetljenost obiju strana plohe jednaka, pa je

$$E_p = E_x$$

a kako je

$$E_p = \frac{J_p}{r_p^2}, \text{ a } E_x = \frac{J_x}{r_x^2}$$

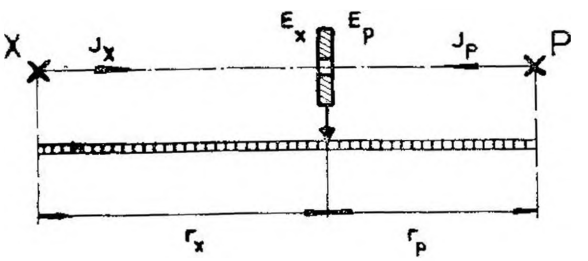
može se, dakle, pisati:

$$\frac{J_p}{r_p^2} = \frac{J_x}{r_x^2} \text{ ili: } \frac{J_p}{J_x} = \frac{r_p^2}{r_x^2}$$

Odavde proizlazi da je:

$$J_x = J_p \cdot \frac{r_x^2}{r_p^2} = J_p \cdot \left(\frac{r_x}{r_p}\right)^2 \qquad (18)$$

To znači da se kod jednako osvijetljene plohe jakosti svjetlosti obaju izvora odnose kao kvadrati njihovih udaljenosti od dotične plohe.



Sl. 12. Fotometrijski stol

P - poznati izvor svjetlosti; X - mjereni izvor svjetlosti; J_p - poznata jakost svjetlosti; J_x - mjerena jakost svjetlosti; r_p - udaljenost poznatog izvora od obasjavane plohe; r_x - udaljenost mjerenog izvora od obasjavane plohe; E_p - osvijetljenost što je ostvaruje poznati izvor svjetlosti P; E_x - osvijetljenost što je ostvaruje mjereni izvor svjetlosti X

Princip takva mjerenja prikazuje sl. 12, gdje se vidi tzv. fotometrijski stol. Najjednostavniji fotometar sastoji se od bijelog papira na kojemu je uljem načinjena masna mrlja. Ta mrlja propušta više, a reflektira manje svjetlosti nego ostala površina papira. Već prema tome s koje strane promatramo papir, činit će nam se masna mrlja svjetlijom ili tamnijom od ostalog dijela papira. Ako je papir jače obasjan sa strane koja je suprotna promatraču, onda će se njemu mrlja na papiru činiti svjetlijom od ostalog dijela papira; i obratno, ako je papir jače obasjan sa strane promatračeve, njemu će se mrlja na papiru činiti tamnijom.

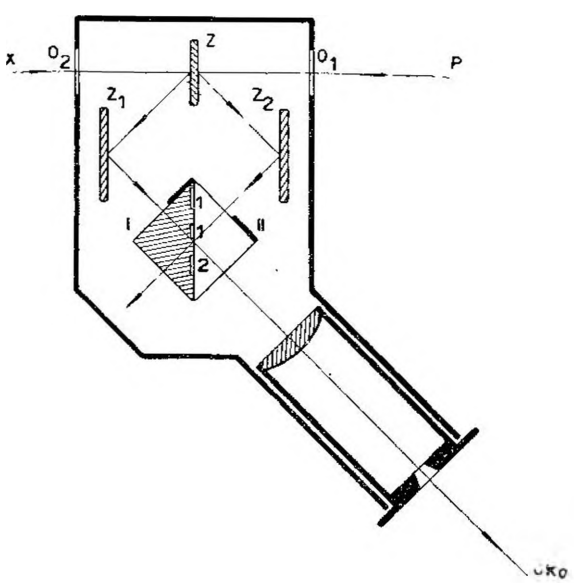
Mjerenje se vrši tako da se papir pomiče u vodoravnom smjeru sve dotle dok nam se ne učini da je čitava njegova površina obasjana potpuno jednolično. Tada se izmjeri udaljenost papira od obaju svjetlosnih izvora, **P** i **X** (dakle, r_p i r_x), pa — kako poznajemo jakost svjetlosti J_p izvora **P** — možemo izračunati traženu jakost svjetlosti J_x uz pomoć izraza (18).

Postoji priličan broj raznih izvedbi fotometara, od kojih se neki predviđaju za fiksni smještaj na fotometrijskoj klupi, dok su drugi prenosivi.

Od stacionarnih se fotometara upotrebljava najviše Lummer-Brodhunov [Lumer-Brodhunov], dok se od prenosivih najviše upotrebljava Weberov [Veberov] fotometar.

4.1.1. Kontrastni Lummer-Brodhunov fotometar

Glavni dio ovoga fotometra jesu dvije jednake prizme, **I** i **II** (sl. 13), s ravnim hipotenuzama. U hipotenuzi prizme **I** načinjena su udubljenja **1** i **2**, što se još bolje vidi na sl. 14. Na tim je mjestima između prizama ostvaren tanak sloj zraka. Na ostalom dijelu svoje površine prilježe prizma **I** potpuno uz prizmu **II**.

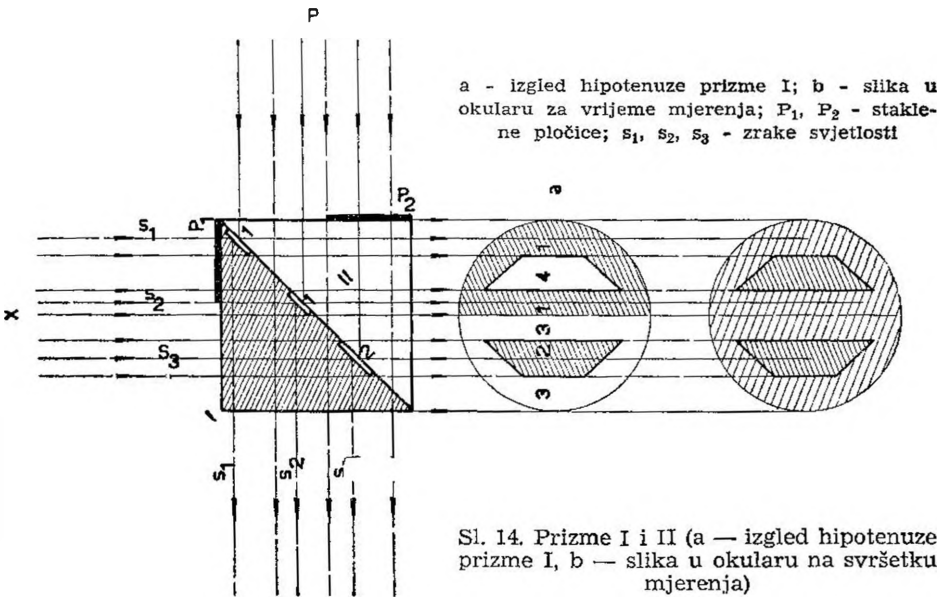


P - poznati svjetlosni izvor; O_1, O_2 - otvori u fotometru; **Z** - zaslon od sadre; Z_1, Z_2 - zrcala I, II - prizme; 1, 2 - udubljenja prizme I

Sl. 13. Kontrastni fotometar Lummer-Brodhunov

Fotometar se postavi na fotometrijsku klupu tako da svjetlosne zrake iz poznatog izvora **P** ulaze u nj kroz otvor O_1, a iz mjerenog svjetlosnog izvora **X** kroz O_2.

Svjetlosne zrake koje ulaze u fotometar iz svjetlosnog izvora **P** padaju najprije na bijeli neprovidni zaslon **Z** od sadre koji ima zadaću da upadno svjetlo difuzno rasprši. Difundirane zrake padaju na zrcalo Z_2 čija je površina paralelna s uzdužnom osi fotometra. Od njega se one reflektiraju na sustav prizama **I** i **II**.

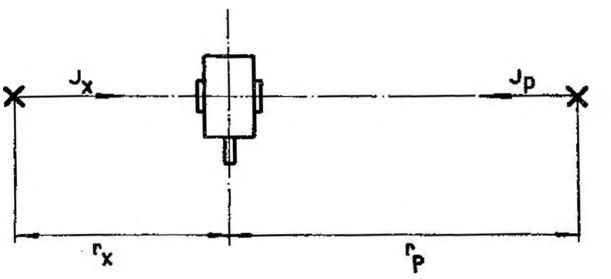


a - izgled hipotenuze prizme I; b - slika u okularu za vrijeme mjerenja; P_1, P_2 - staklene pločice; s_1, s_2, s_3 - zrake svjetlosti

Sl. 14. Prizme I i II (a — izgled hipotenuze prizme I, b — slika u okularu na svršetku mjerenja)

One zrake koje padnu na dodirnu površinu obiju prizama nastavljaju svoj put bez promjene i padaju na suprotnu stijenu kućišta fotometra. Kako su unutrašnje stijene fotometra obojene crno, one ove zrake apsorbiraju tako da ne sudjeluju pri mjerenju.

Svjetlosne zrake koje padnu na mjesto gdje se nalaze udubljenja **1** i **2** reflektiraju se po zakonu pravilne refleksije i odlaze u okular, gdje ih oko promatrača vidi onako kako to prikazuje šrafirana površina na sl. 14.a) (površina **1** i **2**).



Sl. 15. Mjerenje jakosti svjetlosti fotometrom na fotometrijskom stolu

Zrake svjetlosti koje iz mjerenoga izvora dolaze u fotometar kroz otvor O_2 padaju također najprije na drugu stranu sadrenog zaslona **Z**, od koje se difuzno raspršuju. Jedan dio tih zraka odlazi prema zrcalu Z_1, koje ih reflektira prema prizmama **I** i **II**.

One zrake koje padnu na poleđinu udubljenja **1** i **2** pravilno se reflektiraju (zrake s_1, s_2 i s_3) prema crnoj stijeni kućišta, koja ih apsorbira.

Zrake koje padnu na dodirnu površinu obiju prizama prolaze bez promjene i kroz okular ulaze u oko promatrača; u njemu stvaraju sliku koju prikazuje svijetla površina na sl. 14.a) (površina **3** i **4**).

Za vrijeme mjerenja pomiče se fotometar na fotometrijskoj klupi (sl. 15) tako dugo dok plohe **1** i **3** ne budu jednako osvijetljene i dok unutrašnje površine **2** i **4** ne kontrastiraju jednako prema njima. Radi postizanja toga kontrasta stavljaju se staklene pločice P_1 i P_2; one apsorbiraju jedan dio svjetlosti tako da su površine **2** i **4** osvijetljene oko 8% slabije nego plohe **1** i **3**. Kad je to postignuto, u oku promatrača nastaje slika koju prikazuje sl. 14.b).

S pomoću ovoga fotometra može se odrediti jakost svjetlosti s točnošću od $\pm$ 0,25%.

Ako je fotometar previše udesno, onda su površine **1** i **2** svjetlije od površina **3** i **4**.

Obratno, ako je fotometar previše ulijevo, tj. preblizu mjerenog izvora **X**, onda su površine **1** i **2** tamnije od površina **3** i **4**.

Budući da se ovdje, zapravo, uspoređuje luminancija obiju strana zaslona **Z**, moraju, naravno, obje njegove strane imati potpuno jednaku sposobnost difuzije, odnosno refleksije.

Kad smo postigli izgled prema sl. 14.b), očitamo udaljenosti r_p i r_x i, poznavajući jakost svjetlosti J_p izvora **P**, možemo izračunati traženu jakost svjetlosti s pomoću relacije (18):

$$J_x = J_p \cdot \left(\frac{r_x}{r_p}\right)^2$$

S pomoću fotometra možemo također odrediti svjetlosni tok raznih svjetlosnih izvora, i to u kombinaciji s tzv. Ulbrichtovom [Ulbrihtovom] kuglom.

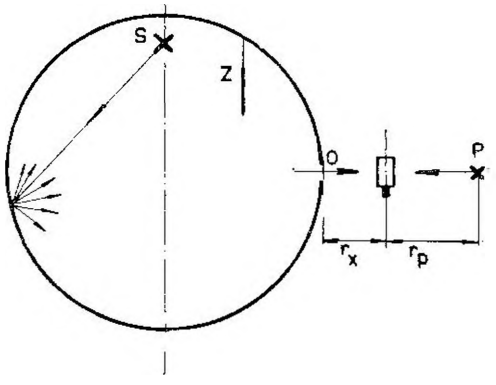
4.2. Mjerenje svjetlosnoga toka s pomoću Ulbrichtove kugle

To je šuplja željezna kugla koja je iznutra bijelo obojena kako bi svjetlosne zrake difuzno reflektirala uz što manju apsorpciju. Promjer kugle iznosi 0,5—3 m, a ovisi o dimenzijama mjerenoga svjetlosnog izvora: za male izvore, kao npr. žarulje manje snage, promjer kugle treba da je 0,5—1 m, a za izvore većih dimenzija, kao jake žarulje, VTF-sijalice (visokotlačne živine fluorescentne sijalice), natrijeve sijalice, a pogotovu fluorescentne cijevi, potrebna je kugla promjera do 3 m; važno je, naime, da promjer kugle bude što veći prema veličini svjetlosnog izvora.

Na kugli (sl. 16) je u visini ekvatora načinjen otvor **O**, promjera oko 5 cm, koji je zatvoren poklopcem od opal-stakla. Kroz taj se poklopac vrši mjerenje svjetlosne jakosti izvora smještena u kugli.

Za točnost mjerenja veoma je važno da nijedna svjetlosna zraka ne padne na spomenuti poklopac direktno iz izvora; zbog toga se između svjetlosnog izvora **S** i poklopca nalazi svjetlonepropusni zaslon **Z** od bijelo ocakljenog željeznog lima.

Svjetlosni izvor **S** čiji svjetlosni tok želimo odrediti montira se u gornji dio kugle; zrake svjetlosti što ih isijava reflektiraju se od unutrašnje površine kugle potpuno difuzno na sve strane. Zbog toga je osvijetljenost ove površine na svim mjestima jednaka, pa tako i na opalnom poklopcu. Kroza nj izlazi jedan dio toka iz kugle tako da vanjska površina poklopca ima izvjestan sjaj, koji je proporcionalan osvijetljenosti unutar kugle.



Sl. 16. Ulbrichtova kugla

S - svjetlosni izvor; Z - nepropusni zaslon; O - otvor u kugli; P - poznati izvor svjetlosti

U kugli je ostvarena jednolika osvijetljenost istoga efekta kao da se u njoj nalazi idealni svjetlosni izvor koji bi zračio u svim pravcima potpuno jednoliko.

Jakost svjetlosti koja je kroz otvor **O** izašla u vanjski prostor jednaka je, prema tome, srednjoj prostornoj svjetlosnoj jakosti mjerenog izvora smanjenoj za određeni postotak uslijed gubitka zbog apsorpcije u stijeni kugle, kao i opalnom poklopcu. Spomenute gubitke uzimamo u obzir s pomoću tzv. konstante kugle k, prema relaciji:

$$k = \frac{J_o}{J_m}, \text{ odnosno: } J_o = k \cdot J_m \quad cd \tag{19}$$

Traženi je svjetlosni tok:

$$\Phi = 12{,}57 \cdot J_o = 12{,}57 \cdot k \cdot J_m \quad lm$$

Konstanta kugle **k** određuje se tako da se u kuglu stavi svjetlosni izvor poznate srednje prostorne jakosti svjetlosti, pa se izmjeri svjetlosna jakost J_m izvan poklopca; konstanta je onda:

$$k = \frac{J_o}{J_m}$$

4.3. Mjerenje osvijetljenosti obasjane površine

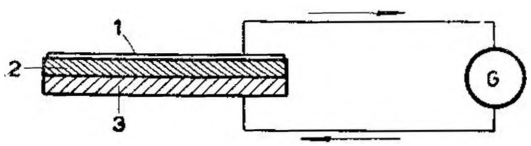
Ovakvo se mjerenje vrši s pomoću tzv. luksmetra. Glavni sastavni dio luksmetra jeste foto-ćelija, koja ima zadaću da svjetlosnu energiju koja na nju padne pretvori u električnu. Zahvaljujući foto-ćeliji, ne trebaju luksmetri nikakva posebnog izvora električne struje.

Foto-ćelija može biti dvojaka:

a) s bakrenim oksidulom Cu_2O ili

b) sa selenom Se.

U prvom slučaju foto-ćelija se sastoji od tanke bakrene pločice Cu koja je s jedne strane prevučena tankim slojem bakrenog oksidula Cu_2O preko kojega dolazi tanka opna od bakra Cu, srebra Ag i zlata Au (sl. 17).



Sl. 17. Foto-ćelija s bakrenim oksidulom

1 - opna; 2 - bakreni oksidul Cu_2O; 3 - bakrena pločica

Na bakrenu pločicu priključi se jedan, a na metalnu opnu drugi kraj osjetljivog galvanometra s okretnim svitkom. Ako svjetlosne zrake nakon prolaza kroz opnu padnu na bakreni oksidul Cu_2O u elementu Cu_2O-Cu javit će se EMS, koja će protjerati određenu električnu struju kroz strujni krug što ga sačinjavaju Cu_2O-Cu—svitak galvanometra. Smjer te struje suprotan je smjeru upadne svjetlosti, dakle,

$$Cu — Cu_2O$$

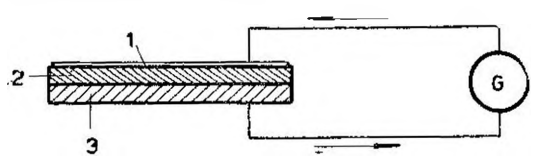
kao što je označeno na sl. 17.

U drugom slučaju foto-ćelija se sastoji od tanke željezne ili aluminijske pločice na koju se stavi veoma tanak sloj selena Se; preko njega dolazi opna od platine Pt ili srebra Ag (sl. 18).

Pri obasjavanju selena Se preko metalne opne javi se u elementu EMS, koja u strujnom krugu foto-ćelija—galvanometar izazove električnu struju. Smjer ove struje identičan je sa smjerom upadne svjetlosti, dakle,

opna — selen

kako se to vidi na sl. 18.



Sl. 18. Selenska foto-ćelija

1 - opna; 2 - selen; 3 - pločica od željeza ili aluminija

Zbog svoje mnogo veće osjetljivosti upotrebljava se samo još selenska ćelija.

Za osvijetljenost do oko 10 000 lx jakosti su struje približno proporcionalne s mjerenom osvijetljenošću: otklon kazaljke je, dakle, uglavnom raz-

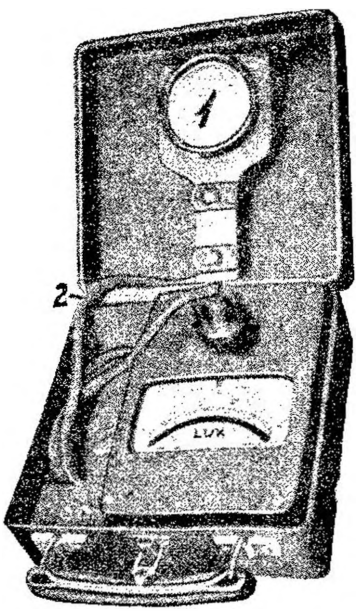
mjeran s osvijetljenošću. Ovaj proporcionalitet je to točniji što je manji otpor same foto-ćelije, kao i otpor upotrijebljenoga galvanometra. Prema tome, ako se skala galvanometra ne baždari u mA, nego u lx, može se osvijetljenost očitavati izravno sa skale.

Sl. 19. prikazuje takav jedan luksmetar: brojem 1 označena je foto-ćelija, a brojem 2 dulji vod (do 2 m), preko kojega je foto-ćelija spojena s galvanometrom pa se osvijetljenost može mjeriti i na najnezgodnijim mjestima.

Postoje i male izvedbe luksmetara, koje stanu u džep; jednu takvu izvedbu prikazuje sl. 20.

Sl. 19. Veća izvedba luksmetra (lijevo)

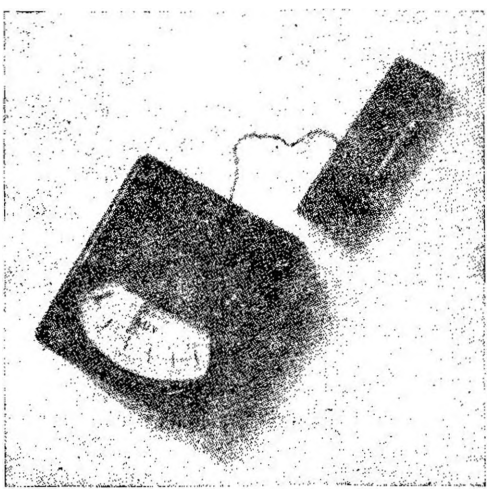
1 - foto-ćelija; 2 - vod, koji spaja foto-ćeliju s instrumentom



Mi sa skale instrumenta očitavamo veći broj luksa nego što ih daju vidljive zrake. Upotrebom prikladno obojenih filtera takve su greške danas skoro potpuno odstranjene tako da je osjetljivost foto-ćelije praktički jednaka osjetljivosti oka.

Luksmetar je neophodno pomagalo svakoga svjetlotehničkog stručnjaka; on nam omogućuje svakovremenu kontrolu stanja rasvjete na pojedinim radnim mjestima, provjeravanje ispravnosti proračuna osvijetljenosti i sl.

Sl. 20. Džepni luksmetar (obje donje)



Luksmetri ne mogu biti potpuno točni, i to zato što je jakost struje u foto-ćeliji zavisna o boji svjetlosti.

Dnevna svjetlost sadrži više plavih zraka nego većina umjetnih svjetlosnih izvora pa izaziva jaču struju nego, npr., jednaka količina svjetlosti crvene boje. Danje svjetlo, kao i svjetlost živinih sijalica, sadrži osim vidljivih još i nevidljive ultraljubičaste zrake koje, doduše, naše oko ne zapaža, ali ih registrira foto-ćelija luksmetra. Kazaljka galvanometra pokazuje, prema tome, veći otklon nego što to odgovara sadržaju vidljivih zraka.